

非定常乱流の速度計測

高見敏弘 喜多義範* 釜井敦巳** 乙田康博

岡山理科大学工学部機械工学科

*岡山大学工学部機械工学科

** (株)川鉄物流

(1999年11月4日 受理)

1. 緒言

定常乱流の3方向速度計測では、例えば単一傾斜熱線を用いた回転プローブ法^{1,2)}によって、時間平均速度の3成分(\overline{U} , \overline{V} , \overline{W})とレイノルズ応力(変動速度の相互相関)の6成分($\overline{u'^2}$, $\overline{v'^2}$, $\overline{w'^2}$, $\overline{u'v'}$, $\overline{v'w'}$, $\overline{w'u'}$)を測定する方法が確立されている。一方、流れ(流量)が時間的に変化する管内乱流や間欠噴流のような非定常乱流では、複数の熱線を組み合わせた多センサー式熱線プローブ³⁻¹⁴⁾を用いて同時計測した瞬時のセンサー出力から、データ処理によって瞬時の3方向速度(U , V , W)を算出し、その後、瞬時の平均速度や同時相関(レイノルズ応力)を統計処理する必要がある。しかしながら、非定常乱流の速度計測では非常に多大の作業と時間が必要となるため、この速度計測を実際に行った報告はあまり見あたらない。

本報告では、直円管内の非定常乱流について、瞬時の3方向速度(U , V , W)を同時計測する方法を開発するとともに、平均速度や乱れのエネルギーなどの時系列データを統計処理する方法について検討した。速度計測のセンサーには、センサー出力を分解して精度良好な3方向速度成分が得られ、かつセンサー製作に制約の少ない非直交形3線式プローブを用いた。また、非定常乱流の時系列計測データを統計処理する際には、ある時刻の平均速度および変動速度を分離するのにアンサンブル平均法(多数回の時系列データ群から同時刻の平均値を求める位相

固定処理)を採用し、非定常変化する平均速度の3成分や平均レイノルズ応力(同時相関)の6成分を計算する方法について検討した。

2. 測定原理

本研究に用いた3線式熱線プローブ[TSI:1299CI-20]の概略を図1に示す。熱線流速計のセンサー部は、プローブ軸に対する熱線センサーの姿勢角度 α , β が互いに異なる3本の傾斜熱線で構成されている。ここで、プローブ軸回りの角度 α が 120° 間隔で、かつプローブ軸に対する傾斜角度 β が 54.74° ⁸⁾のとき、3本の熱線は互いに空間直交することから、そのような熱線プローブは直交形3線式プローブと呼ばれ、測定原理としてデータ処理の解析式や誤差評価などが幾つか報告^{3,8-10)}されている。しかしながら、実際の計測では空間直交形に3本の熱線を簡便に構成することは不可能なため、特定の空間幾何形状を有しない非直交形3線式プローブを使わざるを得ない現状にある。そのため、本研究では、まず、非直交形3線式プローブについて比較的汎用性のある測定原理を確立する。図1の3本の熱線センサーは、後述の計測システム(図4参照)に示すようにいずれも同じ定温度型熱線流速計システムによって動作するので、ここでは図2に示すように1本の傾斜熱線を取り上げ、残る2本の傾斜熱線も同様に扱うこととしてデータ処理を考える。

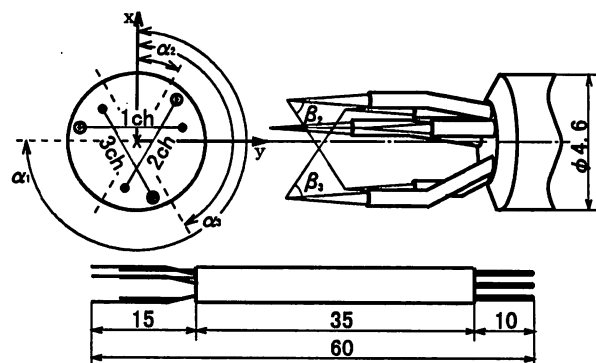


Fig.1 Triple Hot-Wires Probe

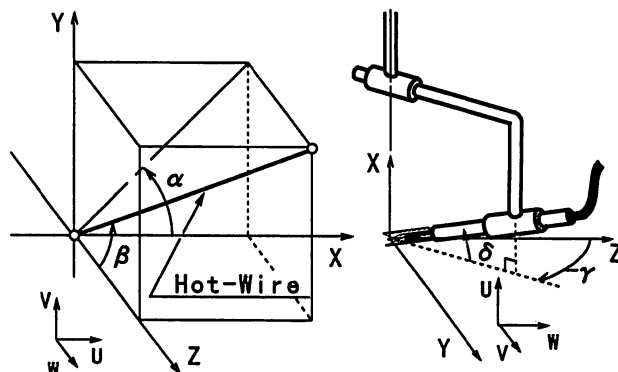


Fig.2 Coordinate System for Hot-Wire Probe

2-1 3方向速度のデータ処理

図2の座標系(X, Y, Z)における熱線センサーの有効冷却速度 U_e は、よく知られているように、3方向の速度成分(U, V, W)を用いると、

$$U_e^2 = D_1 U^2 + D_2 V^2 + D_3 W^2 + D_4 UV + D_5 VW + D_6 WU \quad \dots (1)$$

と表され²⁾、特性係数 $D_1 \sim D_6$ はそれぞれ熱線のヨー係数 k 、ピッチ係数 h を用いて、

$$\begin{aligned} D_1 &= C_{31} C_{31} + k C_{11} C_{11} + h C_{21} C_{21} \\ D_2 &= C_{32} C_{32} + k C_{12} C_{12} + h C_{22} C_{22} \\ D_3 &= C_{33} C_{33} + k C_{13} C_{13} + h C_{23} C_{23} \quad \dots (2) \\ D_4 &= 2(C_{31} C_{32} + k C_{11} C_{12} + h C_{21} C_{22}) \\ D_5 &= 2(C_{32} C_{33} + k C_{12} C_{13} + h C_{22} C_{23}) \\ D_6 &= 2(C_{33} C_{31} + k C_{13} C_{11} + h C_{23} C_{21}) \end{aligned}$$

となる。ここで、係数 C_{ij} は、 α, β :プローブ軸に対する熱線の姿勢角度、 γ, δ : $z-y$ 面、 $z-x$ 面内のプローブ軸の傾斜角度の方向余弦関数[関数式は文献(2)参照]である。

求めるべき未知量は瞬時の速度成分(U, V, W)の3個であるから、3つの異なる状態の熱線センサー出力(有効冷却速度 U_e^2)を与えれば、熱線の応答特性式(1)からその解として(U, V, W)が算出できる。すなわち、一本のプローブに角度(α, β)の異なる3本の熱線センサーを装着した3線式熱線プローブを用いて、3個の熱線出力データを同時に測定すれば、非定常乱流の3方向速度計測が可能となる。

応答特性式(1)は求めるべき未知量に関して非線形方程式であるから、予測修正法による反復数値計算を行うと、収束解として3方向の瞬時速度成分(U, V, W)が得られる。非線形代数方程式の解法には、安定な解法として知られている共約勾配法を用い、逐次緩和法の反復計算により収束解を求める。計算アルゴリズムを要約すると、

- ① 予測値を仮定し、反復残差を計算する
- ② 反復残差の2乗を最小とらしめる修正値を求める
- ③ 修正値を用いた予測値に付加し、新しい予測値とする
- ④ ①～③を繰り返す
- ⑤ 相対残差が収束判定条件を満足したとき、反復計算を打切る

である。以下、反復計算の詳細を述べる。

いま、熱線方向特性式(1)を $f(s) = U_e(s)^2$ とおき、予測値(U_0, V_0, W_0)を代入したときの有効冷却速度を $f_0(s)$ とすると、

$$\text{残差: } R(s) = f(s) - f_0(s) \quad \dots (3a)$$

$$\text{修正値: } \Delta U = U - U_0, \Delta V = V - V_0, \Delta W = W - W_0 \quad (3b)$$

の関係を与える残差方程式は、

$$R(s) = 2(G_1(s) \Delta U + G_2(s) \Delta V + G_3(s) \Delta W) \quad (4)$$

と近似できる。ここで、上付き添字(s)は各熱線のch呼

び番号($s=1, 2, 3$)を表し、

$$\begin{aligned} G_1(s) &= D_1(s) U_0 + (D_4(s) V_0 + D_6(s) W_0) / 2 \\ G_2(s) &= D_2(s) V_0 + (D_4(s) U_0 + D_5(s) W_0) / 2 \quad (5) \\ G_3(s) &= D_3(s) W_0 + (D_5(s) V_0 + D_6(s) U_0) / 2 \end{aligned}$$

である。よって、各熱線($s=1, 2, 3$)の残差について、

$$2(G_1^{(1)} \Delta U + G_2^{(1)} \Delta V + G_3^{(1)} \Delta W) = R^{(1)} \quad (6)$$

$$2(G_1^{(2)} \Delta U + G_2^{(2)} \Delta V + G_3^{(2)} \Delta W) = R^{(2)} \quad (6)$$

$$2(G_1^{(3)} \Delta U + G_2^{(3)} \Delta V + G_3^{(3)} \Delta W) = R^{(3)} \quad (6)$$

なる3個の残差方程式が導かれる。この連立方程式を解くと3個の修正値($\Delta U, \Delta V, \Delta W$)が求まる。この修正値に緩和係数を乗じた値を用いた予測値(U_0, V_0, W_0)に加えて新しい予測値とし、再び式(4), (5)を計算する。

各相対残差が

$$\left| \frac{\Delta U}{U} \right|, \left| \frac{\Delta V}{V} \right|, \left| \frac{\Delta W}{W} \right|, \left| \frac{R(s)}{f(s)} \right| \leq 10^{-4} \quad \dots (7)$$

なる収束判定条件を満足するまで計算を繰返すと、収束解として瞬時の3方向速度(U, V, W)が算出される。

2-2 非定常乱流のデータ処理

計測に用いる3線式プローブが理想的に適切ならば、原理的には、前述したデータ処理によって非定常乱流における瞬時の3方向速度成分(U, V, W)を計測することができる。しかし、実際には、3線式プローブのセンサー部は非常に小さいが有限の計測体積を有するため、データ処理の前提となる空間の1点における3個のセンサー出力を厳密には計測できない。このため、空間分解能の誤差をデータ処理およびその結果に含めてしまうことになる。また、変動速度が平均速度よりも大きい場合、反復計算の収束性はかなり悪くなる(最悪の場合、収束解が得られないことがある)ことや、変動速度と反復計算の修正速度は同程度の大きさとなる場合が多いため、反復計算により得られた変動速度の正確さ(信頼性)は低下する場合が多い。そこで、これらの問題点対策として、位相固定したアンサンブル平均法による乱流統計量(3個の平均速度と6個のレイノルズ応力相当量)を求める場合には、ある時刻Tの平均速度成分とその変動速度成分を分離し、それぞれの3方向成分を算出する。

このため、次のような仮定を設ける。

- ① $U_e = \langle U_e \rangle + u_e'$ ならば、

$$U = \langle U \rangle + u', V = \langle V \rangle + v', W = \langle W \rangle + w' \text{ と表示できる}$$

- ② ($\langle U \rangle, \langle V \rangle, \langle W \rangle$)は、 $\langle U_e \rangle$ により求められる

まず、仮定①を熱線方向特性式(1)へ代入すると、

$$\begin{aligned} U_e^2 &= D_1 (\langle U \rangle^2 + 2\langle U \rangle u' + u'^2) \\ &+ D_2 (\langle V \rangle^2 + 2\langle V \rangle v' + v'^2) \\ &+ D_3 (\langle W \rangle^2 + 2\langle W \rangle w' + w'^2) \\ &+ D_4 (\langle U \rangle \langle V \rangle + \langle U \rangle v' + \langle V \rangle u' + u' v') \\ &+ D_5 (\langle V \rangle \langle W \rangle + \langle V \rangle w' + \langle W \rangle v' + v' w') \\ &+ D_6 (\langle W \rangle \langle U \rangle + \langle W \rangle u' + \langle U \rangle w' + w' u') \quad \dots (8) \end{aligned}$$

となる。仮定②より

$$\begin{aligned} \langle U_e \rangle^2 = & \{D_1 \langle U \rangle + (D_4 \langle V \rangle + D_6 \langle W \rangle) / 2\} \langle U \rangle \\ & + \{D_2 \langle V \rangle + (D_5 \langle W \rangle + D_4 \langle U \rangle) / 2\} \langle V \rangle \\ & + \{D_3 \langle W \rangle + (D_6 \langle U \rangle + D_5 \langle V \rangle) / 2\} \langle W \rangle \cdots (9) \end{aligned}$$

であるから、式(8)から式(9)の辺々を差引くと、次式が導かれる。

$$\begin{aligned} U_e^2 - \langle U_e \rangle^2 = & [(2D_1 \langle U \rangle + D_4 \langle V \rangle + D_6 \langle W \rangle) \\ & + \{D_1 u' + (D_4 v' + D_6 w') / 2\} u' \\ & + \{(2D_2 \langle V \rangle + D_4 \langle U \rangle + D_5 \langle W \rangle) \\ & + \{D_2 v' + (D_4 u' + D_5 w') / 2\} v' \\ & + \{(2D_3 \langle W \rangle + D_5 \langle V \rangle + D_6 \langle U \rangle) \\ & + \{D_3 w' + (D_5 v' + D_6 u') / 2\} w' \cdots (10) \end{aligned}$$

ここで、添字 $\langle \rangle, ' : \text{アンサンブル位相固定平均値, 変動値}$ を表す。従って、式(9)により平均速度成分 $\langle U \rangle, \langle V \rangle, \langle W \rangle$ を求めた後、この平均速度と式(10)により瞬時の変動速度成分 (u', v', w') を求めることができる。

式(9), (10)はともに求めるべき変数に関して非線形方程式であるから、前節と同様に、3線式プローブの各熱線($s=1, 2, 3$)について3個の残差方程式を導き、予測修正法により反復数値計算すると、式(9)よりアンサンブル平均速度成分 $\langle U \rangle, \langle V \rangle, \langle W \rangle$ が、式(10)より変動速度成分 (u', v', w') が収束解として得られる。最終的に得られたある時刻 T における瞬時の変動速度成分 (u', v', w') を用いて、例えば

$$\langle w'^2(T) \rangle = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \{w'(T)_j\}^2 \cdots (11)$$

$$\langle w' u'(T) \rangle = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \{w'(T)_j u'(T)_j\}$$

なるアンサンブル平均操作を施すと、6個の位相固定平均レイノルズ応力が求められる。

2-3 速度特性の自動補正

本研究のように多数回の実験データからアンサンブル平均量を求めるためには、長時間(約40時間)にわたる計測を必要とする。そのような場合、計測中に生じる環境変化など種々の要因に伴って熱線センサーの速度特性

$$U_e = a + b E \cdots (12)$$

の速度係数 a, b は経時変化することがよく知られている。ここで、 $U_e[m/s] : \text{有効冷却速度, } E[V] : \text{熱線センサーの出力電圧}$ である。この速度係数 a, b は、前節までに述べたデータ処理によって、熱線センサーの出力電圧から各速度成分 (U, V, W) の大きさを決定する重要なパラメータであるので、常に計測中の正確な値を把握しておく必要がある。しかしながら、本計測の3線式熱線プローブのような多センサー式計測器ではセンサー個々の経時特性が異なるため、その変化率を把握することは難しいことが多い。本研究では、計測中の測定部において、

熱線センサーの速度特性を計測データを用いて自動的に補正する方法(自動補正)を考案した。以下、自動補正の原理を述べる。

いま、計測開始前の状態を添字0で表し、計測の諸量を次のように表す。

	計測前	計測後	補正後
速度係数:	a_0, b_0	$\rightarrow a_0, b_0$	$\rightarrow a, b$
有効速度:	U_{e0}	$\rightarrow U_{e0}$	$\rightarrow U_e$
速度成分:	U_0, V_0, W_0	$\rightarrow U, V, W$	$\rightarrow U_0, V_0, W_0$

計測中の流動条件は変化しないよう常に監視し、計測前の各速度成分 (U_0, V_0, W_0) の絶対値は計測後も変化しないものとする。しかし、実験室の気温変化や熱線の汚れなどによって熱線センサーの出力は変化するため、計測前の速度係数 a_0, b_0 を用いてデータ処理された計測後の速度成分は (U, V, W) と変化した場合を考える。すなわち、この計測後の (U, V, W) を計測前の (U_0, V_0, W_0) に一致させるために、計測前の速度係数 a_0, b_0 を補正して計測後の正確な速度係数 a, b を与える

$$\begin{aligned} \Delta a^{(s)} &= a^{(s)} - a_0^{(s)} \\ \Delta b^{(s)} &= b^{(s)} - b_0^{(s)} \end{aligned} \cdots (13a)$$

を求める。ここで、上付き添字 (s) は各熱線のch呼び番号($s=1, 2, 3$)を表す。

まず、熱線方向特性式(1)を $f^{(s)} = U_e^{(s)2}$ とおき、計測前の流動条件 (U_0, V_0, W_0) を式(1)に代入した時の値 $f_0^{(s)}$ から、

$$\text{残差} : R^{(s)} = f^{(s)} - f_0^{(s)} \cdots (14a)$$

をつくり、変数 (U, V, W) に関してテイラー展開し、

$$\text{速度差} : \Delta U = U - U_0, \Delta V = V - V_0, \Delta W = W - W_0 \quad (14b)$$

に関する高次項を無視すると、残差 $R^{(s)}$ は

$$R^{(s)} = 2(G_1^{(s)} \Delta U + G_2^{(s)} \Delta V + G_3^{(s)} \Delta W) \quad (15)$$

と近似できる。ここで、 $G_k^{(s)}$ は式(5)と形式的に同じである。

一方、この残差 $R^{(s)}$ を0にするため、すなわち計測前後の見かけの速度差 $(\Delta U, \Delta V, \Delta W)$ を0にするために、速度係数を式(13a)のように補正するとき、有効冷却速度とその差は

$$U_e = a + b E, U_{e0} = a_0 + b_0 E \cdots (16a)$$

$$\Delta U_e = U_e - U_{e0} = \Delta a + E \Delta b \cdots (16b)$$

と表され、

$$\text{残差} : R^{(s)} = U_e^{(s)2} - U_{e0}^{(s)2} \cdots (13b)$$

は、展開後、 $\Delta U_e^{(s)}$ の高次項を無視すると、

$$\begin{aligned} R^{(s)} &= 2 U_{e0}^{(s)} \Delta U_e^{(s)} \\ &= 2 U_{e0}^{(s)} (\Delta a^{(s)} + E^{(s)} \Delta b^{(s)}) \end{aligned} \quad (17)$$

と表される。

結局、式(15)と式(17)の両残差 $R^{(s)}$ を等置すると、

$$\begin{aligned} U_{e0}^{(s)} (\Delta a^{(s)} + E^{(s)} \Delta b^{(s)}) \\ = G_1^{(s)} \Delta U + G_2^{(s)} \Delta V + G_3^{(s)} \Delta W \end{aligned} \quad (18)$$

なる補正值 $\Delta a^{(s)}, \Delta b^{(s)}$ に関する方程式が導かれ

る。式(18)の求めるべき未知量は2個であるので、異なる2状態の連立方程式が必要となる。後述するように、本研究の非定常流れでは、低速期(Low)と高速期(High)の2状態を毎回の計測データに含むよう時間スケジュールを設定してあるので、低速期・高速期それぞれの期間における計測データを用いると、残差方程式(18)は

$$U_{eL}(s)(\Delta a(s) + E_L(s)\Delta b(s)) = Q_L(s) \quad (19)$$

$$U_{eH}(s)(\Delta a(s) + E_H(s)\Delta b(s)) = Q_H(s)$$

なる連立方程式に置き換えることができる。ここで、添字L, Hは低速期(Low), 高速期(High)流れの計測値を表し、

$$U_{eL}(s) = a_0(s) + b_0(s)E_L(s) \quad (20)$$

$$U_{eH}(s) = a_0(s) + b_0(s)E_H(s)$$

かつ

$$Q_L(s) = G_{1L}(s)\Delta U_L + G_{2L}(s)\Delta V_L + G_{3L}(s)\Delta W_L \quad (21)$$

$$Q_H(s) = G_{1H}(s)\Delta U_H + G_{2H}(s)\Delta V_H + G_{3H}(s)\Delta W_H$$

である。これによって、係数の補正値が求められる。

以下、自動補正アルゴリズムをまとめると、

① $\Delta U = U - U_0$, $\Delta V = V - V_0$, $\Delta W = W - W_0$ を与える

② 残差方程式より Δa , Δb を計算し、

新しい速度係数 $a = a_0 + \Delta a$, $b = b_0 + \Delta b$ を求める

③ 新しい有効冷却速度 $U_e = a + bE$ を与え、

計測後の速度成分(U , V , W)を計算する

④ ①～③を繰り返し、

計測前の規定速度(U_0 , V_0 , W_0)となる

正確な速度係数 a , b を探る

となる。

なお、この速度特性の自動補正は、計測中、3線式熱線プローブの全ての熱線センサー($s=1, 2, 3$)に対して施す。また、この補正を行うための規定速度(U_0 , V_0 , W_0)を与える流れ場には、予め素性のよく知られている流れ場(例えば、円管中心の流れ $U_0=0$, $V_0=0$)を利用するのが、経験上、好適であった。

3. 測定

3-1 実験装置と計測システム

本実験に使用した供試管路の概略を図3に示す。装置は上流から供試管路、3線式熱線プローブを含む計測装置、電磁弁[ASCO:8215A40]、吸込送風機および吐出管から構成されている。管路下流に設けた吸込送風機により

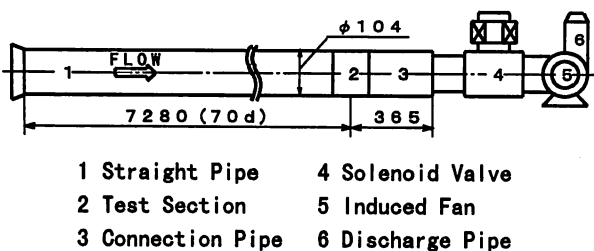


Fig. 3 Schema of Tested Pipe

供試管路内に空気を流し、タイマ式リレーを介して電磁弁の開閉を制御することにより、供試管路内に非定常乱流を発生させる。管路は、直径 $d=104\text{mm}$ の円形断面を有する長さ 7280mm (70 d) の上流直管部、長さ 365mm の下流直管部および両者の接続部に設けた計測部で構成されている。計測部は、熱線プローブを挿入しやすいように上下に分割できる半割形の構造を有する長さ 300mm のアクリル製管路で、熱線プローブを移動させるためのトラバース装置を固定したスリッリングがはめ込まれている。各部の継ぎ目は空気が漏れないように白色ワセリンを用いて注意深く接合されている。

計測システムの概略を図4に示す。非定常流れの時間スケジュールと3線式熱線プローブによる計測データの収録は、全てPCによってプログラム制御されている。3線式熱線プローブの出力は、それぞれ3組の定温度型熱線流速計システムCTA/LIN[KANOMAX:システム7114]により流速に比例した電圧として出力される。この3組の電圧信号は、ADCモジュール[CONTEC:AD12-8RT, 8ch同時サンプリング, 時間間隔0.3ms~30s可変]により同時にデジタル変換され、ついで制御PCを介して大容量外部記憶装置[iomega:jaz, 1GB]に転送される。収録された時系列の計測データは、高速PCにより種々の演算処理を施された後、出力される。また、制御PCからADCモジュールへ計測開始命令が送られると同時に、DIOモジュール[CONTEC:PIO-16E]を介して電磁弁コントローラへ作動トリガ信号が出力され、タイマ回路により電磁弁が開閉し、管路内に非定常乱流が作られる。

3-2 3線式プローブと校正

3線式熱線プローブ(図1参照)は、センサ部を構成する3本の傾斜熱線(直径 $5\mu\text{m}$ ・長さ約 3mm のタングステン線)を直径 4.6mm のステンレス管の先端に正面から見て逆三角形に配置し、管内トラバース装置に装着して用いた。この3線式プローブによる計測では、2節の測定原理に述べたように各傾斜熱線センサーの正確な空間配置を予め知っておく必要がある。そのため、計測に先立ち、図5に示す3次元校正風洞装置を用いて3線式プローブの

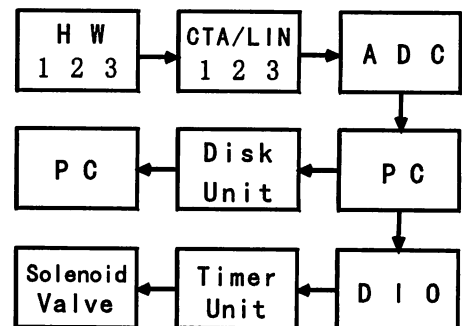


Fig. 4 Measurement Instruments System

3次元検定を行った。

3次元検定データの例を図6に示す。検定では、円管内で実際に計測するときと同じ状態、すなわちプローブ軸を垂直面内で $\delta=2^\circ$ 起こした状態に3線式プローブを設定して、プローブ軸を水平面内で傾斜させながら3組の熱線流速計出力を同時に計測した[図6(a)]。また、校正風洞内においてZ方向以外つまりX, Y方向の出力も正確に知るために、プローブ軸を風の流れに対して垂直に傾けた状態でも計測した[図6(b)]。図の縦軸は計測した熱線の有効冷却速度 U_e を校正風洞のノズル流速 U_c (≈ 7 [m/s])で除した値、横軸はプローブ軸の傾斜角度で、水平面(Z-Y面)内の角度 γ あるいは垂直面(Z-X面)内の角度 δ である。また、図中の実線は、各熱線のヨー係数 k ($=0.0$)、ピッチ係数 h ($=1.0$)、表1に示すプローブ軸回りの角度 α 、プローブ軸に対する傾斜角度 β およびプローブ軸の傾斜角度 γ , δ を特性式(1), (2)に代入して求めた有効冷却速度 U_e の結果を表す。ここで、本実験で用いた3線式プローブは、熱線姿勢角度 $\beta=60^\circ \sim 65^\circ$ の範囲にあり、空間直交条件 $\beta=54.74^\circ$ よりも大きい非直交形プローブである。これらの検定データの結果より、3線式プローブによる計測では、プローブ軸方向に対して立体

角土約 30° 内の速度ベクトルを検出できるものと考えられる。ちなみに、流れの速度ベクトルの検出可能範囲は、非直交形3線式プローブの方が直交形よりもやや狭くなることが報告^{8,12)}されているが、回転プローブ法^{1,2)}の検出可能角度土約 60° 内に比べるとかなり狭いようである。これは、3線式プローブの場合、センサー部を構成する3本の熱線が互いに流れの干渉を起こすことによるものと思われる。なお、実際の管内計測では、管壁近くの流れを計測できるようプローブ軸の垂直面内傾斜角度を $\delta=2^\circ$ とした。

3-3 実験条件と測定例

非定常流れの流動状態は、低速状態(Low)→加速状態(Accelerate)→高速状態(High)→減速状態(Decelerate)→低速状態(Low)を繰り返す。これらの流動状態の持続時間は、電磁弁コントローラのタイマ設定を変更することによって調節できる。本研究では、非定常流れの繰り返しタイムスケジュールを

- $t=0 \sim 3$ [sec] : 低速期(Low speed period)
- $t=3$ [sec] : 電磁弁の開信号
- $t=3 \sim 4$ [sec] : 加速期(Accelerating period)
- $t=4 \sim 7$ [sec] : 高速期(High speed period)

Tab.1 Angles of Triple Hot-Wires

(a)	α	β	γ	δ
1ch	261°	63°	—	2°
2ch	18°	61°		
3ch	141°	61°		
(b)	α	β	γ	δ
1ch	263°	63°	0°	—
2ch	21°	62°		
3ch	142°	62°		

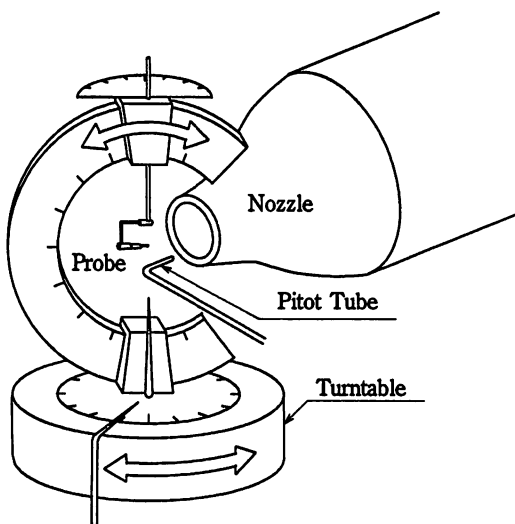
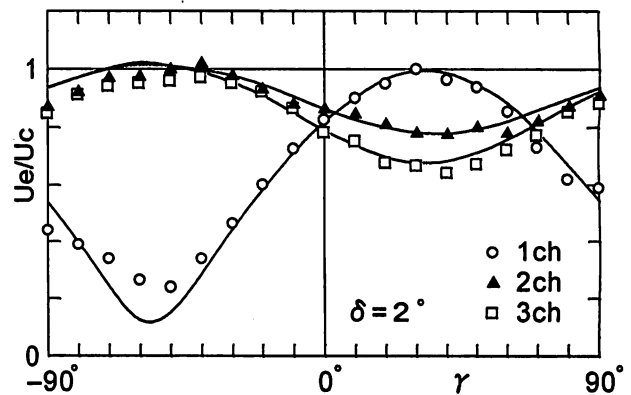
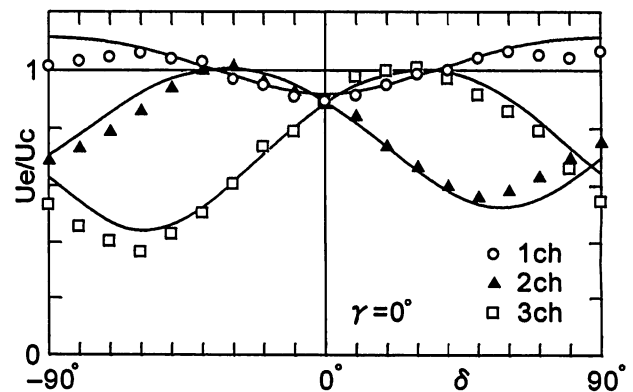


Fig.5 Three-Dimensional Calibrator



(a) Performance in Horizontal (Z-Y) Plane



(b) Performance in Vertical (Z-X) Plane

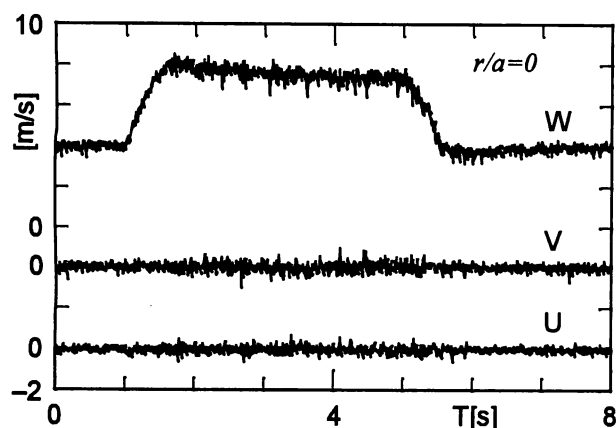
Fig.6 Directional Calibration of Triple Hot-Wires

$t = 7$ [sec] : 電磁弁の閉信号
 $t = 7 \sim 8$ [sec] : 減速期(Decelerating period)
 $t = 8 \sim 10$ [sec] : 低速期(Low speed period)

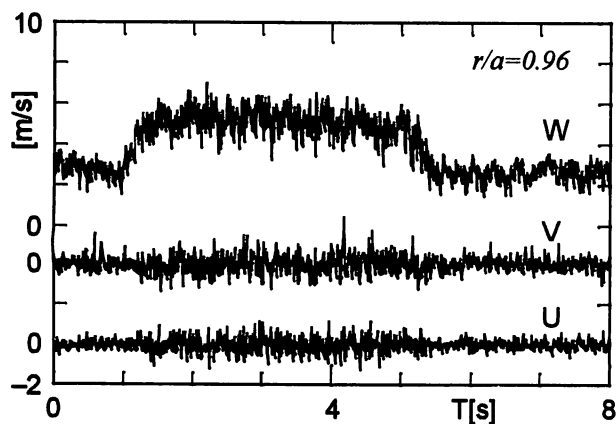
の合計10[sec]と設定し、初期 $t = 0 \sim 2$ [sec] の流れを繰り返しの制限むだ時間と見なして計測期間から除外し、 $t = 2 \sim 10$ [sec] の期間に1回の時系列計測を終了した。ここで、加速期および減速期の時間長は、使用した電磁弁の特性に依存し、それぞれ約1[sec]を必要とした。

計測データのサンプリング収録は、計測期間8 sec中にサンプリング時間間隔8[msec](サンプリング周波数125[Hz])で個数 $N = 1,000$ 個のデータ(3組の熱線センサー出力)を収録した。そして、統計処理方法として位相固定平均法を採用するために、上述の計測を計測回数 $M = 1,000$ 回繰り返し、収録された $1,000 \times 1,000 \times 3$ 個の膨大な量のデータを2節に述べた方法により演算・統計処理した。ちなみに、管内の速度分布を調べるためにトラバース計測した管半径14カ所のデータを、高速PC(CPU: Pentium II, 400[MHz])で演算・統計処理するために要した時間は、データ転送時間も含めて約100時間であった。

測定例として、管中心 $r/a = 0$ と管壁近傍 $r/a = 0.96$ に



(a) at Pipe Center



(b) near Pipe Wall

Fig.7 Unsteady Variation of Instantaneous Velocity

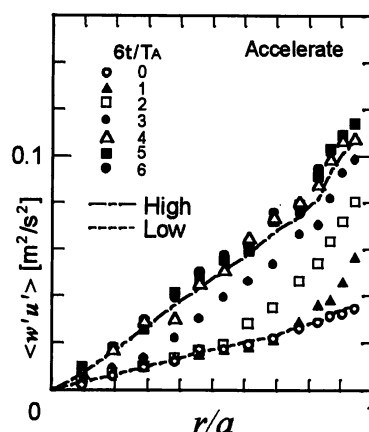
において計測した3方向速度成分(U, V, W)の時間変化を図7に示す。図の横軸は計測開始時刻 $t = 2$ [sec]からの経過時間 T [sec]を表し、(U, V, W)はそれぞれ半径, 周, 管軸方向の瞬時速度成分である。計測した平均速度分布の結果を基に、低速期 $T = 0 \sim 0.8$ [sec]と高速期 $T = 4 \sim 4.8$ [sec]の期間において短時間平均した管断面平均速度 W_a (レイノルズ数 $Re = W_a d / \nu$)は、それぞれ

低速期: $W_{aL} \div 2.8$ [m/s] ($Re_L \div 2.0 \times 10^4$)

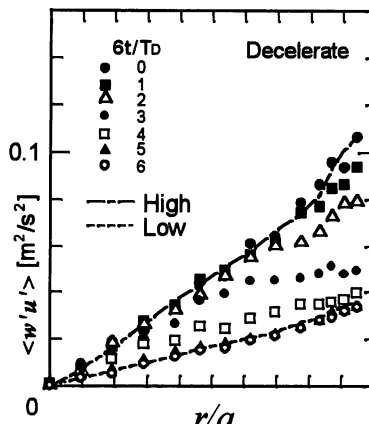
高速期: $W_{aH} \div 7.2$ [m/s] ($Re_H \div 4.0 \times 10^4$)

であり、本研究の非定常変化は乱流状態⇔乱流状態と設定されている。そのため、計測した管内全域で3方向の瞬時速度成分(U, V, W)にはどの時刻でも乱れの変動速度成分が現れている。この乱れは管壁近傍の高速期に最も強くなるが、このような壁乱流の乱れ場でも2節に述べたデータ処理によって3方向の瞬時速度成分を連続した時系列データとして得られている。

図7の瞬時速度データでは計測結果の妥当性を判別し難いので、位相固定平均法によって得られた平均レイノルズ応力 $\langle w'u' \rangle$ の管内分布を加速期(Accelerate)と減速期(Decelerate)について調べた結果を図8に示す。図中



(a) during Accelerating Period



(b) during Decelerating Period

Fig.8 Distribution of Average Reynolds Stress

の一点鎖線と破線はそれぞれ高速期(High)と低速期(Low)の結果を表し、プロット点は非定常変化中のデータを表す。ここで、ほぼ定常乱流状態と見なせる高速期と低速期の結果に着目すると、定常管内乱流における従来の実験結果と同じく、平均レイノルズ応力分布は管中心から管壁へ向かってほぼ直線的に増加している。また、この直線を延長した壁面上の漸近値は、低速機・高速期ともに、それぞれのRe数($Re_H \div 4.0 \times 10^4$, $Re_L \div 2.0 \times 10^4$)をブラジウスの式に代入して簡便に見積もられる壁面剪断応力

$$\tau_w / \rho = \lambda W a^2 / 8 \quad (\lambda = 0.3164 Re^{-1/4}) \quad \dots (22)$$

にほぼ一致する。これらのことから、本研究で提案したデータ処理法および計測法は実用上十分な精度を有しているものと考えられる。

4. まとめ

非直交形3線式プローブを用いて、非定常乱流の3方向瞬時速度計測を検討した。以下に本研究をまとめる。
 (1)空間直交の制約が無い汎用性の高い非直交形3線式プローブのセンサー出力を、3方向瞬時速度成分に分解するデータ処理法を提案した。
 (2)強い変動を伴う非定常乱流場でも良好な精度で3方向速度成分が得られるよう、平均速度と変動速度を個別に算出するデータ処理法を提案した。
 (3)長時間の使用に伴って生じるセンサー個々の経時変化特性を、一括して自動的に補正する計測法を提案した。
 (4)本研究で提案したデータ処理法および計測法は、実用

上十分な精度を有していることを確かめた。

参考文献

- 1) 須藤・高見・檜原, 日本機械学会論文集(B編), 58-546(1992), 379-385.
- 2) T. Takami, JSME Int. J. (Ser. B), 41-1(1998), 145-150.
- 3) C. Gaulier, DISA Info., 21(1977), 16-20.
- 4) 喜多・日景・広瀬, 日本機械学会論文集(B編), 45-391(1979), 437-442.
- 5) M.N. Frota, R.J. Moffat and S. Honami, DISA Info., 28(1983), 15-18.
- 6) J. Buddhavarapu and D. Meinen, Flow Lines (TSI), Spring(1988), 1-3.
- 7) 高濱・志澤・本阿弥, 日本機械学会論文集(B編), 55-510(1989), 344-350.
- 8) I.C. Lekakis, R.J. Adrian and B.G. Jones, Exp. Fluids, 7(1989), 228-240.
- 9) S. Russ and T.W. Simon, Flow Lines (TSI), Winter(1990), 3-9.
- 10) B. Sammler and H. Kitzing, DANTEC Info., 9(1990), 16-18.
- 11) U.R. Muller, Exp. Fluids, 13(1992), 208-216.
- 12) 吉野・若・林・名越, 日本機械学会論文集(B編), 58-551(1992), 2151-2157.
- 13) G. Lemonis and T. Dracos, Exp. Fluids, 18(1995), 319-328.
- 14) H.H. Bruun, "Hot-Wire Anemometry", (1995), 189-201, Oxford Univ.

Velocity Measurements in Unsteady Turbulent Flows

Toshihiro TAKAMI, Yoshinori KITA*, Atsumi KAMAI** and Yasuhiro OTUDA

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Okayama University of Science

**Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Okayama University*

***Kawasaki Steel Logistics*

(Received November 4, 1999)

A technique has been developed to measure three components of instantaneous velocity in unsteady turbulent flows using HWA. The HWA sensor was composed of triple hot-wires with non-orthogonally oriented each others. Three sets of the hot-wire signal have been iteratively computed by simultaneously decomposing three sets of the non-linear response equation for the effective velocity of hot-wire, to reduce three components of ensemble means and fluctuations for instantaneous velocities.